

ФИЗИКА

УДК 535.31 + 621.658.011

Измерение распределения разности фаз при линейном двулучепреломлении в твердых телах с внутренними напряжениями

А.В. ХОМЧЕНКО, И.У. ПРИМАК, А.Н. ВАСИЛЕНКО

Исследованы возможности и ограничения применения оптической поляриметрии для анализа распределения двулучепреломления в закаленном стекле. Выполнены исследования оптической анизотропии в стекле различной толщины поляризационно-оптическими методами. Продемонстрирована возможность контроля распределения величины механических напряжений в плоскости широкоформатного закаленного стекла по результатам обработки его изображений в поляризованном свете.
Ключевые слова: закаленные стекла, поляриметрия, контроль распределения двулучепреломления.

The possibilities and limitations of the use of optical polarimetry for analysis of birefringence distribution in the tempered glass are studied. Studies of optical anisotropy in the glass of various thicknesses are made by polarization-optical methods. The ability to control magnitude of the mechanical stresses distribution in the plane widescreen tempered glass according to the results of its image processing in polarized light is shown.
Keywords: tempered glass, polarimetry, measurement technique, birefringence distribution.

Введение. Закаленное стекло, характеристики которого определяются характером и режимами его закалки, широко применяется в автомобилестроении, авиации, судостроении и строительстве. Остаточные напряжения, возникающие при этом, обуславливают прочность закаленного стекла и обеспечивают его безопасную эксплуатацию [1]. Стекло при наличии в нем механических напряжений становится анизотропным, и измерения интенсивности поляризованного света, прошедшего через исследуемый образец, несут информацию о распределении разности фаз, обусловленной различием скорости распространения ортогонально поляризованных волн при их распространении в двулучепреломляющей среде [2]. Поляризационно-оптические методы исследования позволяют измерить ее величину [3]–[6] и, учитывая связь двулучепреломления с главными значениями напряжений, определить величину механических напряжений [7].

При этом следует отметить, что измеряя распределение интенсивности света можно анализировать и оценивать двулучепреломление в отдельной точке или небольшой области стекла, но достаточно сложно это выполнить для протяженных анизотропных объектов. В то же время для оптимизации процессов технологии закалки стекла и разработки технологического оборудования необходимо выполнение анализа возникающего распределения механических напряжений в плоскости стекла. Использование современной цифровой техники в качестве фоторегистрирующего устройства позволяет визуализировать распределение напряжений вдоль поверхности стекла [8].

Настоящая статья является развитием работы [9], посвященной исследованию распределения двулучепреломления в анизотропных прозрачных объектах большой площади.

Визуализация распределения величины двулучепреломления в плоскости закаленных стекол. Для контроля параметров закаленных стекол традиционно применяются поляризационно-оптические методы исследования, основанные на измерении обусловленной механическими напряжениями анизотропии оптических характеристик материала и позволяющие получить представление о напряжениях в стекле [6]. Принципиальная оптическая схема установки, используемой для измерения распределения разности фаз при линейном двулучепреломлении в закаленном стекле, представлена на рисунке 1.

В устройстве параллельный световой пучок от протяженного источника света 1, прошедший через поляризатор 4, падает на исследуемый протяженный образец 5, проходит через анализатор 6, светофильтр 7, фокусируется системой линз 8 на фотоэлектрическую матрицу 9, подключенную к компьютеру 10.

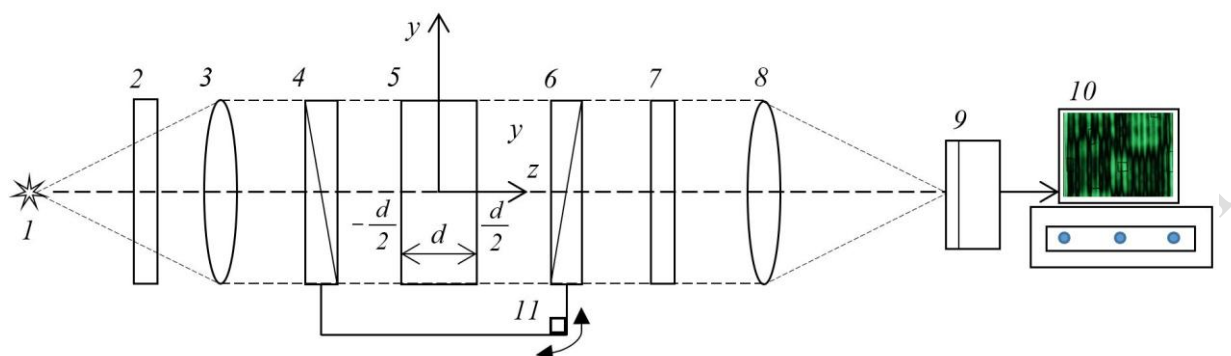


Рисунок 1 – Схема измерительной установки:

1 – источник света; 2 – светофильтр; 3 – объектив;
4 – поляризатор; 5 – контролируемое автомобильное стекло; 6 – анализатор; 7 – светофильтр;
8 – объектив; 9 – фоторегирующее устройство; 10 – компьютер; 11 – система поворота

В результате регистрируется распределение $I(x, y)$ при определенной взаимной ориентации протяженного образца, поляризатора и анализатора. Изменение взаимной ориентации поляризатора и анализатора относительно исследуемого образца осуществляется с помощью системы поворота 11.

Линейно поляризованный свет, пройдя через исследуемое стекло, в котором присутствуют механические напряжения, меняет состояние поляризации, проходит через анализатор и попадает в фоторегирующее устройство. При этом регистрируемая интенсивность света $I(x, y)$ является функцией двух координат (рисунок 2) и определяется как [2, с. 89]

$$I(x, y) = I_p T (\cos^2 \chi - \sin 2\alpha \cdot \sin(2(\alpha - \chi)) \sin^2 \frac{\delta}{2}), \quad (1)$$

где $I_p = I_p(x, y)$ – интенсивность света на выходе из поляризатора, $T = T(x, y)$ – коэффициент учитывающий отражение света от поверхностей стекла, $\alpha = \alpha(x, y)$ – угол между оптической осью и плоскостью пропускания поляризатора, χ – угол между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора, $\delta = \delta(x, y)$ – разность фаз между обыкновенной и необыкновенной волнами.

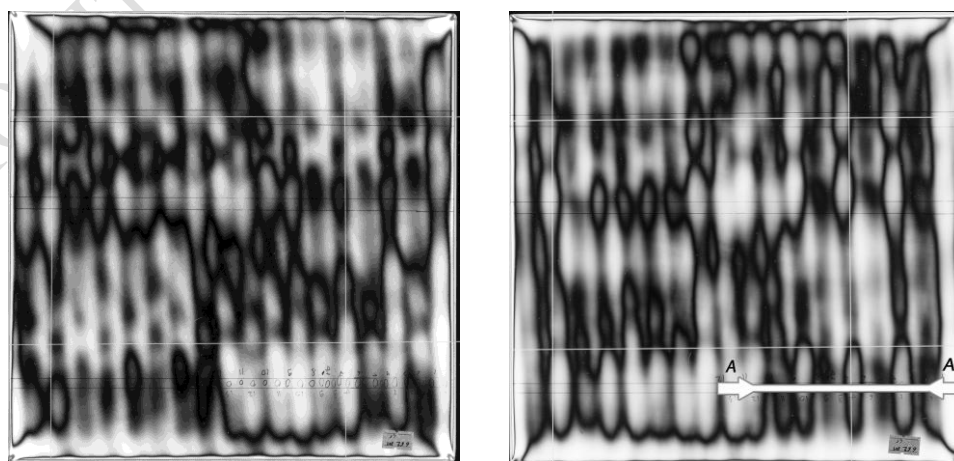


Рисунок 2 – Регистрируемое распределение интенсивности света, прошедшего через исследуемый анизотропный объект для двух отличающихся на 45° ориентаций системы «поляризатор–анализатор» относительно образца размером 300×300 мм.

Обработывая регистрируемые распределения интенсивности $I(x, y)$, можно восстановить разность фаз δ в отдельной точке стекла или небольшой его области и, учитывая ее взаимосвязь с механическими напряжениями, определить их величину [6]. Однако это невозможно сделать для протяженных объектов, которыми являются закаленные стекла. Кроме того, применение поляризационных методов ограничивается тем, что наблюдаемое распределение интенсивности включает в себя систему темных линий, так называемых изоклин, положение которых определяется распределением $\alpha = \alpha(x, y)$ в образце. Анализ результатов исследования распределения интенсивности света, прошедшего через исследуемый анизотропный образец (см. рисунок 2), свидетельствует о том, что изоклины существенно искажают регистрируемое распределение и не позволяют адекватно восстановить распределение разности фаз (при $\alpha = 0$ или $\alpha = \pi/2$ интенсивность прошедшего света $I = 0$, даже если $\delta(x, y)$ отлична от нуля).

Данную проблему можно решить для рассматриваемой точки исследуемого стекла, устанавливая $\alpha = 45^\circ$. В этом случае, как следует из (1),

$$I = I_p |T|^2 \sin^2(\delta/2), \quad (2)$$

но в протяженном объекте, где направление главных напряжений в каждой точке различно, это невозможно выполнить для всего поля напряжений. Известные способы позволяют избавиться от изоклин только в небольших областях восстанавливаемой картины [7] путем использования четвертьволновых пластинок, которые размещают таким образом, что их оси наклонены под углом 45° к плоскости поляризатора и анализатора. Однако использование специальных компенсаторов существенно усложняет контроль напряжений в протяженных объектах [6]–[8].

Для установления оптимальных условий визуализации распределения двулучепреломления в протяженном объекте выполнены измерения $I(x, y)$ при различной ориентации поляризатора и анализатора относительно исследуемого образца. При этом использован алгоритм фильтрации изоклин, который основан на регистрации при определенных условиях двух распределений $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ интенсивности света, прошедшего через исследуемый образец, поляризатор и анализатор, скрещенные под углом 90° , и вычислении распределения $I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y)$, получаемого компьютерным наложением двух зарегистрированных интерферограмм [9]. На рисунке 3 представлено распределение интенсивности при повороте системы «поляризатор – анализатор» на 45° , 90° , 135° и 180° относительно образца стекла толщиной 6 мм на участке 50×50 мм.

На рисунке 4 приведено распределение, полученное в результате указанной выше обработки для 0° и 45° (рисунок 3, а), 45° и 90° (рисунок 3, б), 90° и 135° (рисунок 3, в), 135° и 180° (рисунок 3, г).

Как следует из анализа распределений $I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y)$, представленных на рисунке 4, суммарная картина воспроизводится через каждые 45° . Это означает, что главные оси напряжений лежат в плоскости стекла, и, следовательно, закаленное стекло можно рассматривать как одноосную неоднородную анизотропную среду.

Оценка параметров распределения двулучепреломления в стекле с внутренними напряжениями. При анализе распределения двулучепреломления в плоскости протяженного объекта распределение интенсивности прошедшего света измеряют с использованием схемы, приведенной на рисунке 1, для произвольно выбранной ориентации системы «поляризатор – анализатор» относительно образца I_1 , при этом как следует из выражения (1), распределение $I_1(x, y)$ будет иметь вид:

$$I_1(x, y) = I_p T \sin^2[2\alpha(x, y)] \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2} \quad (3)$$

и после поворота образца на угол 45°

$$I_2(x, y) = I_p T \cos^2[2\alpha(x, y)] \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2}, \quad (4)$$

при этом переход из начального положения, которое выбирают произвольно, во второе осуществляют путем синхронного поворота системы «поляризатор – анализатор» на 45° , а поляризатор и анализатор в обоих случаях оставляют ориентированными под углом 90° относительно друг друга.

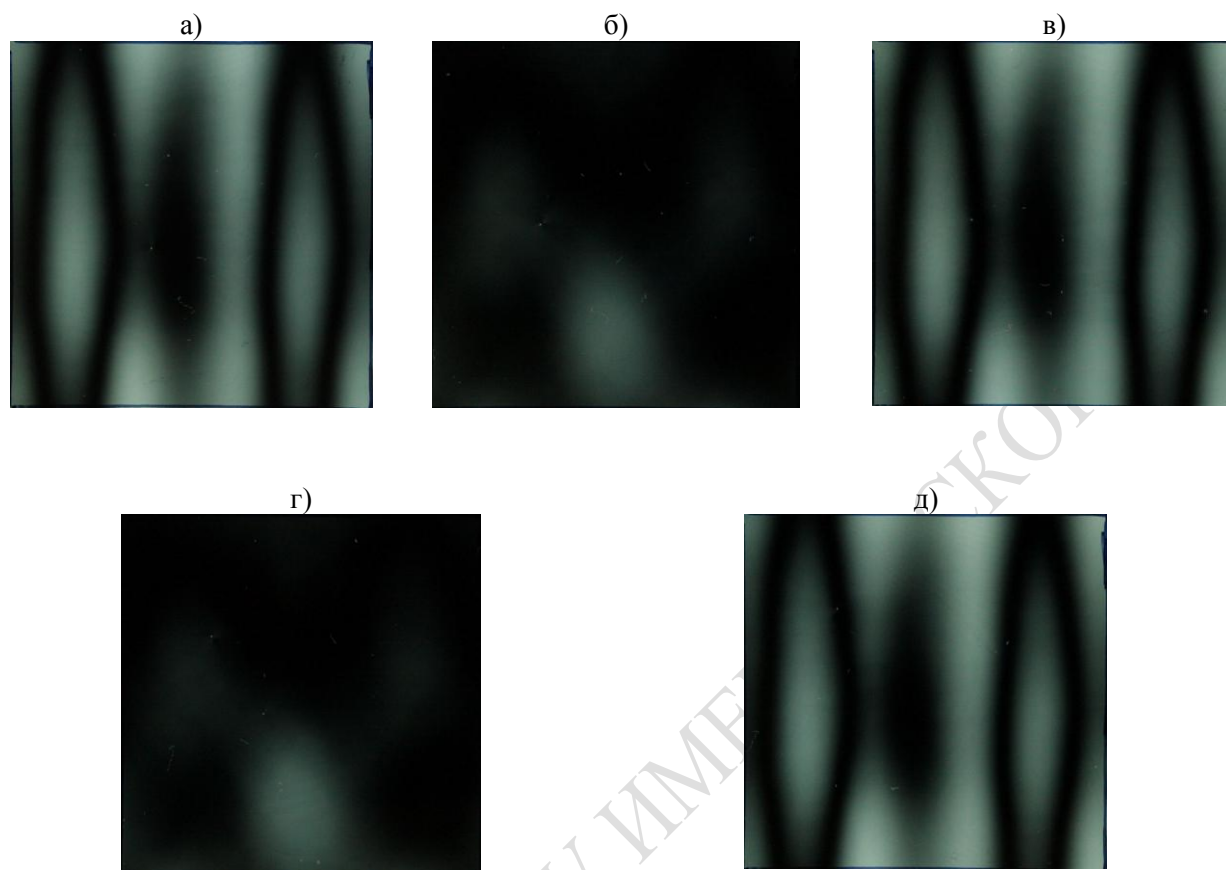


Рисунок 3 – Распределение интенсивности света, прошедшего через анизотропный образец при повороте относительно его системы «поляризатор-анализатор» на 45° (б), 90° (в), 135° (г), 180° (д), (а) исходное взаимное расположение исследуемого образца и системы «поляризатор-анализатор»

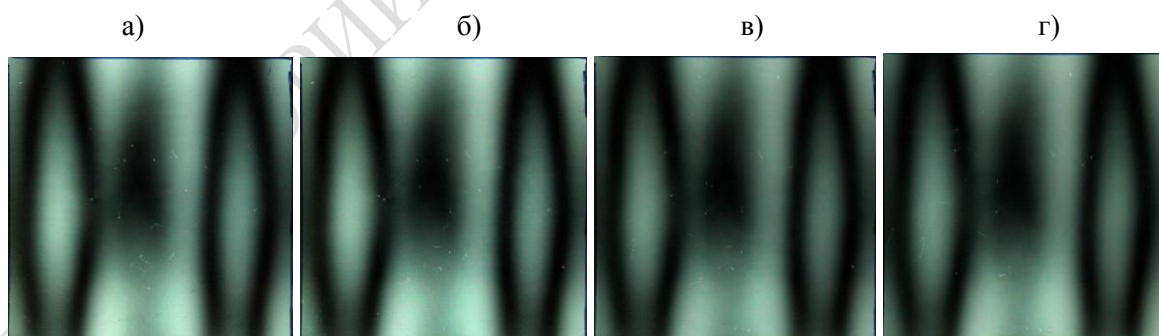


Рисунок 4 – Распределение интенсивности без изоклин, полученное наложением распределений для 0° и 45° (а), 45° и 90° (б), 90° и 135° (в), 135° и 180° (г), приведенных на рисунке 3

После этого вычисляется распределение $I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y)$, получаемое компьютерным наложением двух зарегистрированных интерферограмм, которое, как следует из выражений (3) и (4), не зависит от значения α в любой точке образца

$$I(x, y) = I_1 + I_2 = I_p T \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2}. \quad (5)$$

Следует отметить, что методы определения разности фаз при линейном двулучепреломлении условно можно классифицировать на так называемые нулевые методы гашения и

методы модуляционной поляриметрии [7]. Предложенный выше подход представляет собой новый метод измерения, получивший название поляризационной интерферометрии, позволяет путем наложения двух поляризационных интерферограмм определить из выражения (5) значение разности фаз $\delta(x,y)$ для каждой точки образца, а следовательно, и величину двулучепреломления $\Delta(x,y)$ при произвольной первоначальной ориентации образца относительно системы «поляризатор–анализатор», используя экспериментально измеренные параметры I_1, I_2, I_p, T :

$$\Delta(x,y) = \frac{\arcsin[(I/I_p T)^{1/2}]}{\pi d} \lambda = \frac{\arcsin[((I_1 + I_2)/I_p T)^{1/2}]}{\pi d} \lambda, \quad (6)$$

где λ – длина волны излучения, d – толщина исследуемого образца.

Для оценки двулучепреломления традиционно используется полярископ ПКС-250 [10]. На рисунке 5 точками приведены результаты измерения распределения величины двулучепреломления в отдельных точках образца в соответствии с [10], а также распределение двулучепреломления вдоль линии А-А, указанной на рисунке 2, полученное методом поляризационной интерферометрии с использованием (6). Как следует из анализа представленных данных, наблюдается удовлетворительная корреляция результатов, полученных данным и известными способами измерения двулучепреломления.

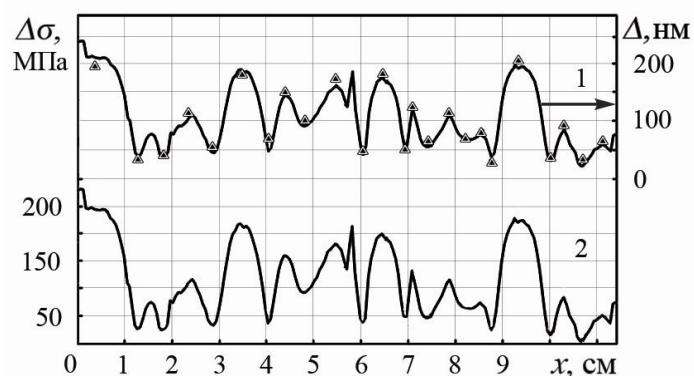


Рисунок 5 – Распределение двулучепреломления (кривая 1) и механических напряжений (кривая 2) вдоль линии А-А, указанной на рисунке 2; точками отмечены значения двулучепреломления в отдельных областях, измеренные в соответствии с [10]

Учитывая взаимосвязь фазы волны с напряжениями [6], можно воспроизвести поле механических напряжений. На рисунке 5 (кривая 2) приведено вычисленное распределение величины механических напряжений вдоль той же линии А-А, указанной на рисунке 2.

Таким образом, поляризационно-оптический метод позволяет измерить распределение механических напряжений в плоскости протяженного объекта, дать качественную и количественную оценку параметров исследуемого образца. Методами поляризационной интерферометрии исследованы образцы закаленного стекла разной толщины, изготовленные при различных режимах закалки. В образцах размером 300×300 мм и толщиной 4, 6 и 8 мм, изготовленных при различных режимах, были выполнены измерения величины механических напряжений с использованием поляризованного излучения с длиной волны 532 нм. Результаты измерений представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Величина механических напряжений в образцах толщиной 6 мм, изготовленных при различных режимах закалки

Режим закалки: давление воздуха в % от $P_{\text{макс}}$	Максимальные напряжения		Степень неоднородности $\sigma_k/\sigma_{\text{ц}}$
	в центре образца $\sigma_{\text{ц}} \cdot 10^8$ Па	вблизи края образца $\sigma_{\text{к}} \cdot 10^8$ Па	
52	2,2	2,1	1,1
62	2,6	2,2	1,2
75	2,8	1,9	1,6

Погрешность измерения двулучепреломления не превышает 2%, что соответствует требованиям [10].

Таблица 2 – Механические напряжения в образцах различной толщины, изготовленных при $P = 0,75 P_{\text{макс}}$

Толщина образца, мм	Режим закалки: давление воздуха в % от $P_{\text{макс}}$	Максимальные напряжения 10^6 , Па
4	75	280–300
	90	290–310
	100	290–320
6	52	190–210
	62	230–240
	75	250–260
8	40	160–180
	75	180–200

Из анализа представленных данных следует, что режимы изготовления образца непосредственно влияют на величину остаточных напряжений и их распределение. Так с возрастанием толщины стекла области анизотропии, возникшие в процессе закалки (охлаждения воздушным потоком с давлением P), становятся шире, а значение напряжений убывает с увеличением толщины стекла. Кроме того, анализ результатов позволяет выбрать оптимальные режимы изготовления закаленных стекол.

Закключение. Предложенный подход представляет собой новый метод измерения и позволяет путем наложения двух поляризационных интерферограмм определить значение разности фаз, обусловленной различием скорости ортогонально поляризованных волн при их распространении в неоднородной двулучепреломляющей среде, для каждой точки образца, а следовательно, и величину двулучепреломления при произвольной первоначальной ориентации образца относительно системы «поляризатор–анализатор», используя измеренные параметры зондирующего светового пучка. Получена удовлетворительная корреляция результатов измерений величины двулучепреломления представленным методом и классической поляриметрией.

Продemonстрирована возможность контроля распределения величины механических напряжений в плоскости широкоформатного закаленного стекла по результатам обработки его изображений в поляризованном свете. Методами поляризационной интерферометрии исследованы образцы закаленного стекла различной толщины, изготовленные при различных режимах закалки. Показано, что режимы изготовления влияют на величину остаточных напряжений и их распределение, так с возрастанием толщины стекла области анизотропии, возникшие в процессе закалки (охлаждения воздушным потоком с давлением P), становятся шире, а неоднородность распределения напряжений убывает с увеличением толщины стекла. Анализ результатов позволяет выбрать оптимальные режимы изготовления закаленных стекол.

Таким образом, представленные результаты исследования оптических свойств закаленных стекол позволяют сделать вывод, что предложенный подход позволяет измерять распределение разности фаз в закаленном стекле и корректно оценивать распределение механических напряжений в неоднородных анизотропных объектах большой площади при устранении искажений в регистрируемой картине, обусловленных влиянием изоклин.

Литература

1. Шутов, А.И. Предельные уровни закалочных напряжений в листовом стекле / А.И. Шутов, Н.А. Герасимова, И.А. Новиков // Стекло и керамика. – 2002. – № 6. – С. 6–8.
2. Оптические свойства кристаллов / А.Ф. Константинова, Б.Н. Гречушников, Б.В. Бокуть, Е.Г. Валяшко. – Мн. : Наука и техника. 1995. – С. 88–94.
3. Helen, S.S. Achromatic phase shifting by a rotating polarizer / S.S. Helen, M.P. Kothiyal, R.S. Sirohy // Optics Communications. – 1998. – Vol. 154. № 5–6. – P. 249–254.
4. Full-field heterodyne polariscope with an image signal processing method for principal axis and phase retardation measurements / Yu-Lung Lo [et al] // Applied Optics – 2006. – Vol. 45, №. 31. – P. 8006–8012.

5. Single-shot polarization-imaging digital holography based on simultaneous phase-shifting interferometry /Tatsuki Tahara [et all] // Optics letters. – 2011. – Vol. 36, №. 16. – P. 3254–3256.
6. Миндлин, Р. Изучение напряжений методом фотоупругости / Р. Миндлин // УФН. – 1940. – Т. 23, № 1. – С. 16–66.
7. Вишняков, Г.Н. Измерение разности фаз при линейном двулучепреломлении в дифференциальном фазовом поляриметре с вращающимся анализатором / Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин, А.Г. Ломакин // Оптический журнал. – 2011. – Т. 78, № 9. – С. 76–81.
8. Bouchal, P. Polarization sensitive phase-shifting Mirau interferometry using a liquid crystal variable retarder / Petr Bouchal, Radek Celechovský, and Zdenek Bouchal // Optics Letters. – 2015. – Vol. 40, №. 19. – P. 4567–4570.
9. Оптические методы контроля распределения механических напряжений в автомобильных закаленных стеклах / А.В. Хомченко [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 4 – С. 125–132.
10. ГОСТ 3519-91 Материалы оптические. Методы определения двулучепреломления. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1992. – 21 с.

Государственное учреждение высшего
профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»

Поступила в редакцию 29.04.2016